

シラスのセン断特性に関する密度および含水比の影響について*

春 山 元 寿

On the Effect of Density and Water Content on the Shear Properties of SHIRASU (Soil of Volcanic Product)

Motohisa HARUYAMA

(Laboratory of Erosion Control)

1. ま え が き

シラス¹⁾は鮮新世末期から更新世にかけての火山噴出物で、その成因上からは軽石流の非溶結部、降下軽石、およびこれらの二次堆積物に識別され、また火山灰、火山砂、および軽石質火山レキから構成される未固結ないし半固結の無機質砂質堆積物である。鉱物組成²⁾は火山ガラスが圧倒的に多く、このほか少量の斜長石、紫蘇輝石、普通輝石、磁鉄鉱および石英などを含む。色は一般に灰色を呈するが、地域によつては黄褐色、淡紅色、あるいは灰黒色を呈する。また乱さないシラスは軽粗な岩相を示すが、乱したものは単なる粒状体である。

上述のようにシラスの鉱物組成は一次鉱物だけであり、界面活性を持つ粘土鉱物を含まないにもかかわらず、そのセン断強さは、乱した状態においても相当の見かけの粘着力を持っている。また、周知のようにシラスは水によつて非常に侵食を受けやすい。シラスを工学的観点からみる場合、侵食についてと力学的性質についての2つの問題がある。

例えば斜面の安定を考える際には、上の2つの問題が同時に満足されることが望ましい。しかし、一般には、これら2つの問題は相反する解答を与える。すなわち、このとき斜面は力学的には緩コウ配が望ましいが、侵食の面からは急コウ配が望ましい。これら2つの相反する結論をどのように調和させるかは土木技術的な手段によつて可能であろう。すなわち、学問上の問題というよりもむしろ技術的なあるいは経済的な段階の問題である。

地表侵食が問題となるような場合については、従来多くの調査・研究がなされており、防災上の基本的な考え方は確立されていると考えてよいであろう。一方、シラスの力学的性質についてはあいまいな点が多かつたので、筆者はこれまでシラスの力学的性質を一貫して説明するための基本となるセン断特性を、排水三軸圧縮試験結果にもとづいて解明してきた。その結果から得られた主な性質をあげると次のとおりである。

(1) 三軸試験に用いた拘束圧の範囲内ではシラスはセン断破壊を示し、破壊限界線は曲線である。そのため、シラスの強さ定数は拘束圧の大きさによつて異なる値を示す。一般に、低い拘束圧のもとでは破壊限界線のコウ配は急であるが、高い拘束圧のもとではそれはゆるやかである。破壊限界線の曲率は供試体の飽和度、間ゲキ比、および拘束圧によつて異なる³⁾⁴⁾⁶⁾。

* 本論文は、Soils and Foundations, Vol. 9, No. 3, Sept. 1969. に発表した Effect of Water Content on the Shear Characteristics of Granular Soils Such as Shirasu を和文訳したものに若干の加筆を行なつたものである。なお、本論文の概要は土木学会第23回年次学術講演会（昭和43年10月）で発表した。

(2) シラスのせん断強さは粒子間の摩擦と構造効果とからなる。構造効果は乱したシラスの場合⁵⁾⁷⁾ インターロッキング⁸⁾ とダイレイタンス⁸⁾ に基因し、乱さないシラスの場合⁶⁾⁷⁾ これらのほかに溶結によるセメンティング効果を含むことがある。

(3) 乱さないシラスのせん断特性は物理的には乱したシラスのそれと同じである⁶⁾。

(4) シラスの見かけの粘着力は構造効果に基因するものである。シラスは粒度配合がよいことおよび粒子形状が特異なことのために構造効果が大きい^{3)~7)9)}。

(5) 見かけの粘着力とせん断抵抗角はそれぞれ独立に動員され⁶⁾、乱さないシラスによれば、見かけの粘着力は軸ヒズミが2~4%で最大となり、せん断抵抗角は軸ヒズミが10~12%で最大となる。乱したシラスによれば、見かけの粘着力およびせん断抵抗角が最大に動員される軸ヒズミは上記の値よりそれぞれ大きくなる傾向を持つ¹⁰⁾。

(6) シラス層中の軽石レキは、シラスのせん断抵抗を増加させる¹¹⁾。

(7) セン断強さと変形特性は密度および含水比によつて変化する。

以上の諸性質のうち(7)については本報で詳説する。

ところで、シラスの直接せん断試験によれば、含水比が約30%をこえるとせん断抵抗は著しく減少することが示されている¹²⁾。また、従来砂のせん断強さに対する水分の影響については、Bishop et al¹³⁾、Tschebotarioff¹⁴⁾、Nash¹⁵⁾、Horn et al¹⁶⁾、および Lee et al¹⁷⁾ などによつて研究が行なわれている。彼等の試験結果から判断すると、せん断強さに対する水分の影響のしかたは砂の種類によつてかなり異なるようである。そこで、ここではシラスのせん断特性に関して水分がどのように影響しているかを詳細に知るために、密度および含水比の異なる供試体について排水三軸圧縮試験を行なつた結果について考察する。

2. 試料、供試体、および試験方法

試験に用いたシラスは鹿児島市唐湊で採取したもので、地質上は入戸軽石流の非溶結部であると考えられる。試験には採取したシラスのうち4,760 μ フルイを通過した部分を用いた。試料の指数的性質を表一1に示す。最大間ゲキ比は気乾試料(含水比0.74%)を内径10cm、高さ12.7cmの円筒モールドにできるだけゆるくつめて求めた。最小間ゲキ比は最大乾燥密度における間ゲキ比である。試料の突固め特性を図一1に、粒度組成を図一2に示す。粒径2,000 μ 以上の粒子はほとんど軽石で、このほかは少量の外来岩片である。2,000 μ 以下の粒子形状を写真一1に示す。この写

Table 1. Index properties of Shirasu sample

Sample	Specific gravity of grains* Uniformity coefficient*, $C_u = D_{60}/D_{10}$ Curvature coefficient*, $C_c = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ Maximum void ratio* Minimum void ratio* Optimum water content* Maximum dry density* Consistency**	2.37 14.3 1.18 1.525 0.800 23.5 per cent 1.317g per cubic cm non-plastic
In situ	Void ratio Bulk density Dry density water content Degree of saturation	1.30 1.26g per cubic cm 1.03g per cubic cm 22.3 per cent 40.7 per cent

* Grains finer than 4,760 micron in diameter

** Grains finer than 420 micron in diameter

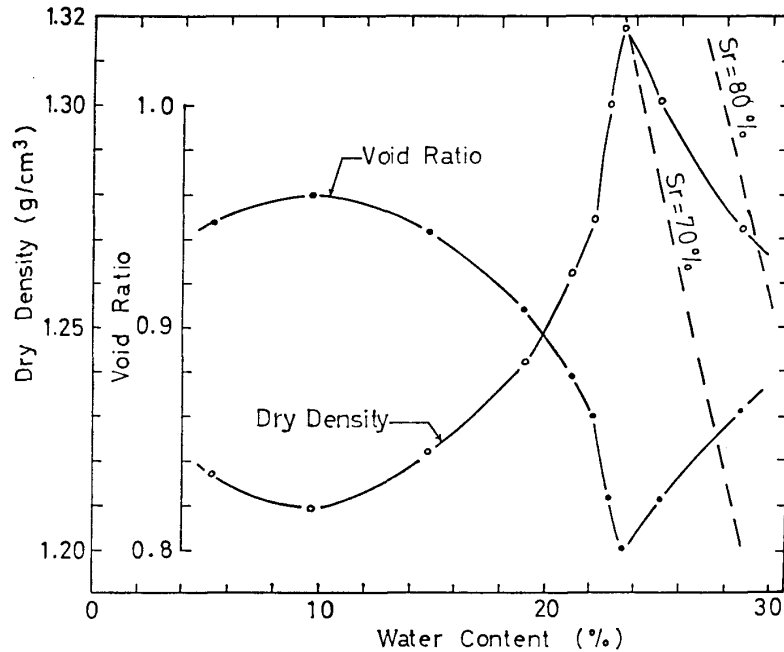


Fig. 1. Compaction-curves for Shirasu sample

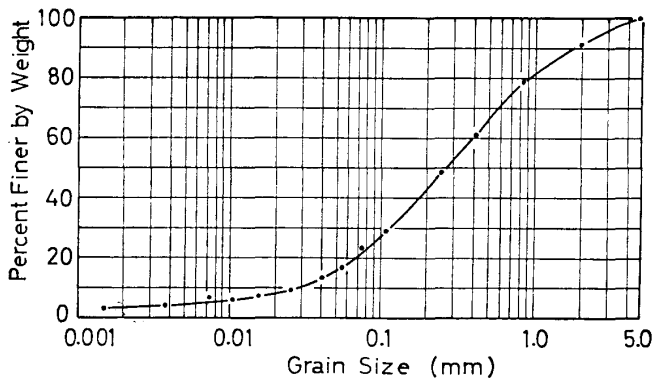


Fig. 2. Grain-size-distribution curve for Shirasu sample

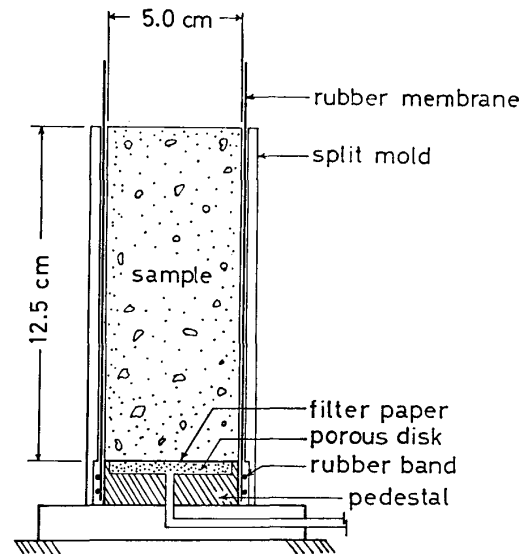


Fig. 3. Forming of specimen for air-dried-Shirasu

真によれば、粗粒部分はあまり角ばっていないが、粒径が小さくなるにしたがつて角ばった粒子が多くなり、最も小さい部分は扁平で角ばったものだけである。粒子表面は一般にはなめらかであるが、時として発泡構造を呈するものもある。

供試体の大きさは直径 5.0 cm、高さ 12.5 cm である。供試体の含水比は気乾状態から飽和状態まで 5 段階とし、それぞれの含水比において供試体の初期間ゲキ比は密な状態からゆるい状態まで 3 ～ 4 段階に調整された。

気乾シラスの供試体の作成方法は、図 3 に示すように、ペデスタルにゴムスリーブとモールドをセットして、所定の試料を注ぎ込んで締固めた。密な供試体は試料を注ぎ込んだあと、モールド

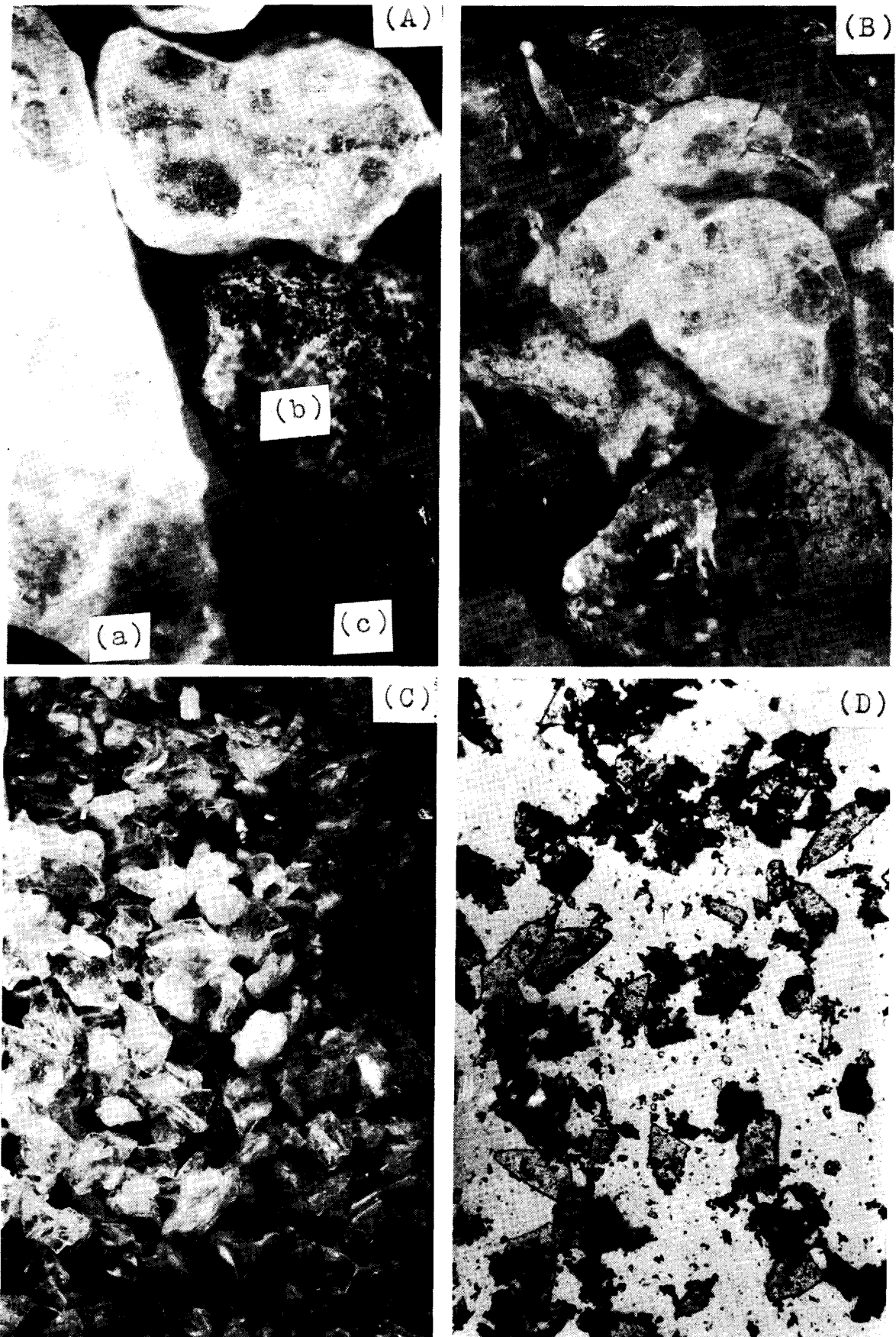


Photo 1. Microphotographs of Shirasu grains

(A) Grains 840 to 2,000 micron in diameter, grains (a); glass fragment, grains (b) and (c); derived rock fragment, (B) Grains 420 to 840 micron in diameter, (C) Grains 74 to 420 micron in diameter, and (D) Grains finer than 74 micron in diameter

の外側を一定回数たたくことによつて締固め、ゆるい供試体はこれをおろく注ぎ込むだけとした。この後、供試体の上面にキャップをセットし、このキャップを通して水銀柱で約 10 cm の真空をかけて供試体を自立させ、モールドを取り除き、供試体の直径と高さを測定した。

部分飽和シラスと飽和シラスの供試体は、あらかじめ試料を所定の含水比で調整して、水分の蒸発を防ぐようにしてビニール袋中で数日間養生した湿潤試料を、内径 5.0 cm のモールドに所定の間ゲキ比を得るように 3～4 層に分けて入れ、各層ごと一定回数突固めて作成した。このようにして作成した供試体を写真一 2 に示す。飽和を必要とする供試体は、その上面から真空をかけ、下面から徐々に給水して完全に飽和させ、その後真空を解放した。給水中の真空度は供試体の変形に影響をおよぼすおそれがあるので、できるだけ小さくし、普通水銀柱で 20 cm とした。

拘束圧は $0.5 \sim 3.0 \text{ kg/cm}^2$ の範囲にとり、拘束圧による圧密の終了後、圧縮速さを供試体高さの $0.8 \sim 1.0 \text{ \% / min}$ とし、軸対称応力条件のもとで排水三軸圧縮試験が行なわれた。本試験に用いた圧縮速さでは不完全排水は起らず、測定応力は有効応力に等しいことがあらかじめ確かめられている。したがつて、体積変化におよぼす間ゲキ水のキャビテーション (Cavitation) の影響は生じない。拘束圧の測定は 2.0 kg/cm^2 以下では水銀マンノメーターにより、それ以上はブルドン管式圧力計により行なつた。圧縮中は軸荷重、軸ヒズミ、および体積変化を測定した。なお、载荷ピストンの摩擦、ゴムスリーブ、および供試体の両端面拘束が軸荷重や体積変化率におよぼす影響は本試験においては無視できる。

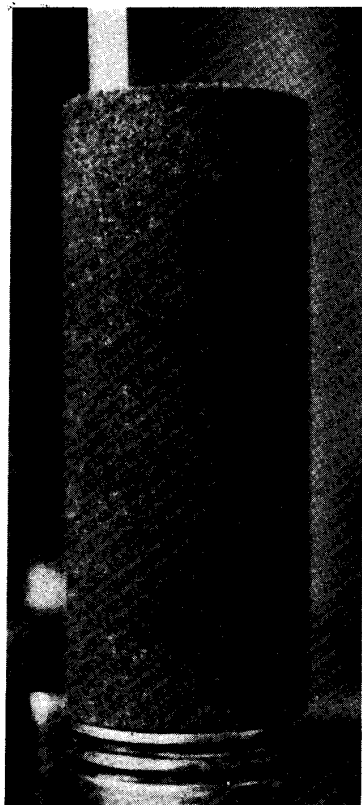


Photo 2. Compacted specimen of Shirasu



Photo 3. Typical failure mode of specimen after drained triaxial compression test, air dried condition, $\sigma_3 = 3.0 \text{ kg/cm}^2$

3. 試験結果および考察

3.1 供試体の変形

1) 破壊様式

この研究では変形中に軸差応力が最大に達したときを破壊点として定義する。破壊後の供試体は写真—3に示されるように、最大主応力面にある傾き α をもつた破壊面が形成される。破壊面の形成は普通の砂では密な供試体の場合だけ観察されるが、シラスにおいては、その密度の大きさにかかわらず観察される。これはシラスが普通の砂と異なる点であり、その原因はシラスと砂との粒度組成のちがいによるものと考えられる。破壊面の形成は軸差応力が最大に達したあと、しばらく軸ヒズミが増加してからはじまり、ゆるい供試体ほど破壊面の形成される軸ヒズミは増加する。破壊面の形成にしたがつて、一般にセン断中の軸差応力は減少し、体積変化は少なくなり、それが完全に形成されると軸差応力および供試体の体積はほとんど一定のままセン断され、終局セン断状態に近づく。

このような破壊面のできかたは応力条件によつて影響される¹⁸⁾。拘束圧（最小主応力）が0である一軸圧縮では、へき開破壊が生じ、破壊面は軸圧（最大主応力）の方向にほぼ平行に形成され、拘束圧のある範囲内では、本試験のようにセン断破壊面が形成される。破壊面のコウ配 α はセン断抵抗角 ϕ と

$$\phi = 2\alpha - \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

なる関係があり、 α を測定して ϕ を算出することがあるが、 α の正確な測定は困難であり、さらにさきに述べたように破壊面のできかたが応力条件によつて影響されるので、 α から ϕ を算出することは好ましくないと考えられる⁶⁾。

2) 軸ヒズミ

軸差応力・軸ヒズミ・体積変化曲線の代表例を図—4および5に示す。拘束圧 σ_3 および破壊時の含水比 w_f 別に軸差応力・軸ヒズミ曲線がピークに達するときの軸ヒズミ ε_f を初期間ゲキ比 e_0 に対してプロットすると、破壊時の軸ヒズミ ε_f と初期間ゲキ比 e_0 の関係が得られる。この関係から初期間ゲキ比が1.10および1.30のときの破壊時の軸ヒズミを求め含水比に対してプロットすると図—6のようになる。図—4, 5 および6からシラスの破壊ヒズミは含水比の増加にしたがつて減少していることがわかる。普通砂に関する Lee et al¹⁷⁾ の試験によれば、普通に用いられる拘束圧の範囲では飽和砂の破壊ヒズミは乾燥砂のそれより大きく、またマサ土に関する内田ら¹⁹⁾ の試験では水分の増加にしたがつて破壊ヒズミは大きくなつており、シラスとは逆の傾向が示されている。

要するに、破壊ヒズミに対する水分の影響のしかたは砂の種類によつて異なるものである。シラスの破壊ヒズミが水分の増加とともに減少する原因は、粒子の表面状態にあると考えられる。すなわち、写真—1に示されるように、シラス粒子は表面のなめらかな火山ガラスが多い。このような粒子の表面にある水分は滑材として作用し、セン断抵抗を減少させるであろうことが Horn et al¹⁶⁾ の試験結果から考えられる。したがつて、粒子の表面水が増加するとともにすべり移動が生じやすくなり、最大強さは相対的に小さいヒズミで動員されると考えられる。

3) 体積変化

排水セン断を受ける供試体は構造の変化に伴う体積変化を生ずる。排水三軸圧縮試験における体

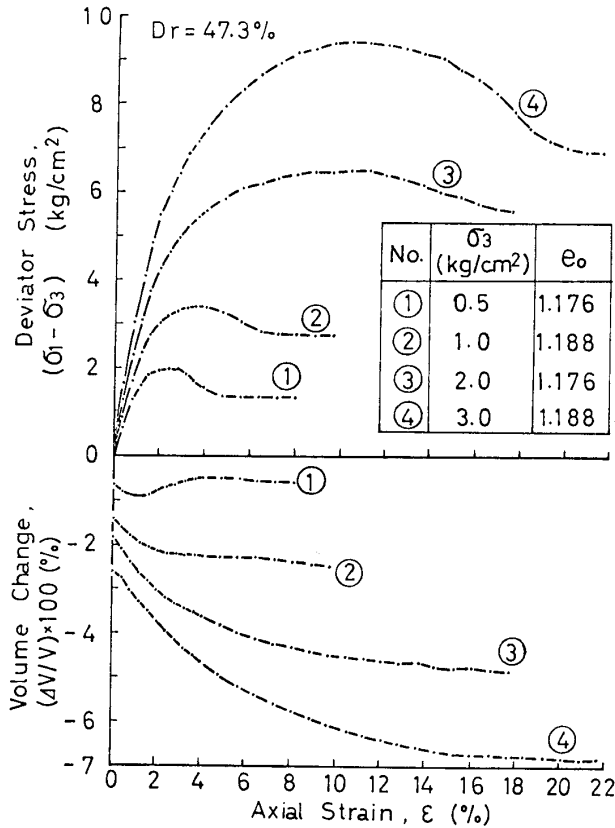


Fig. 4. Deviator stress-axial strain-volume change curves for drained triaxial compression tests on saturated Shirasu

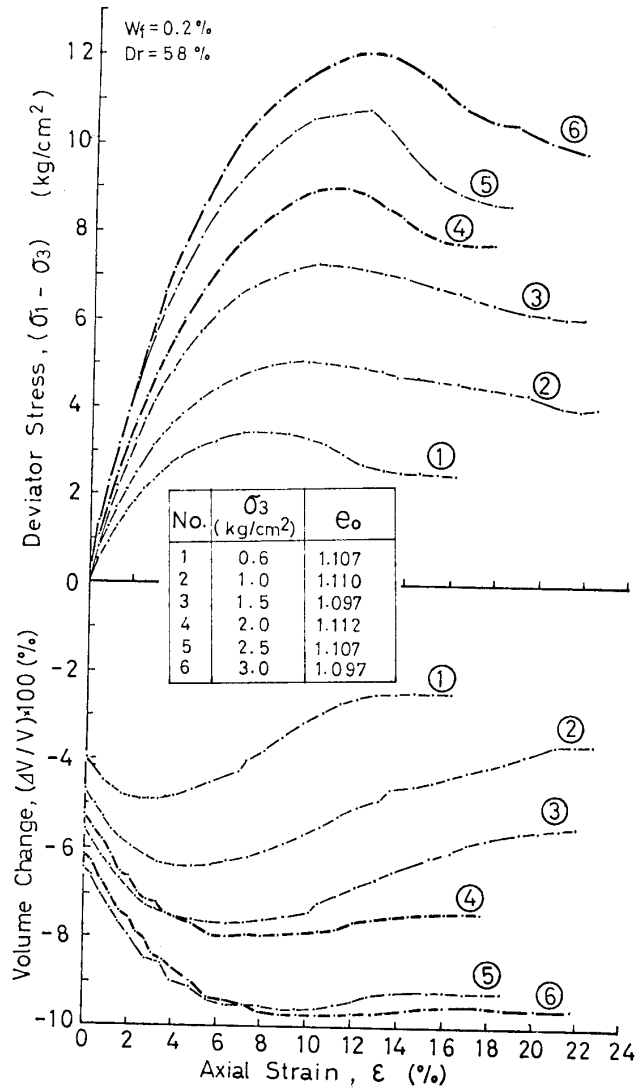


Fig. 5. Deviator stress-axial strain-volume change curves for drained triaxial compression tests on air dried Shirasu

積変化 $\Delta V/V$ は平均主応力 $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ の変化による部分と、せん断応力 $\tau = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}/3$ の変化による部分、すなわちダイレイタンスーとからなり、これを Skempton²⁰⁾ は次式で表わした。

$$\frac{\Delta V}{V} = -C \left(\frac{\Delta \sigma_1' + \Delta \sigma_2' + \Delta \sigma_3'}{3} \right) + D \sqrt{(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_2)^2 + (\Delta \sigma_2 - \Delta \sigma_3)^2 + (\Delta \sigma_3 - \Delta \sigma_1)^2} \quad (2)$$

ここに、 V = 供試体の体積

ΔV = 体積変化量

$\Delta \sigma_1, \Delta \sigma_2$ および $\Delta \sigma_3$ = 主応力の変化量、' のついたものは有効応力表示による主応力の変化量

C = 圧縮係数

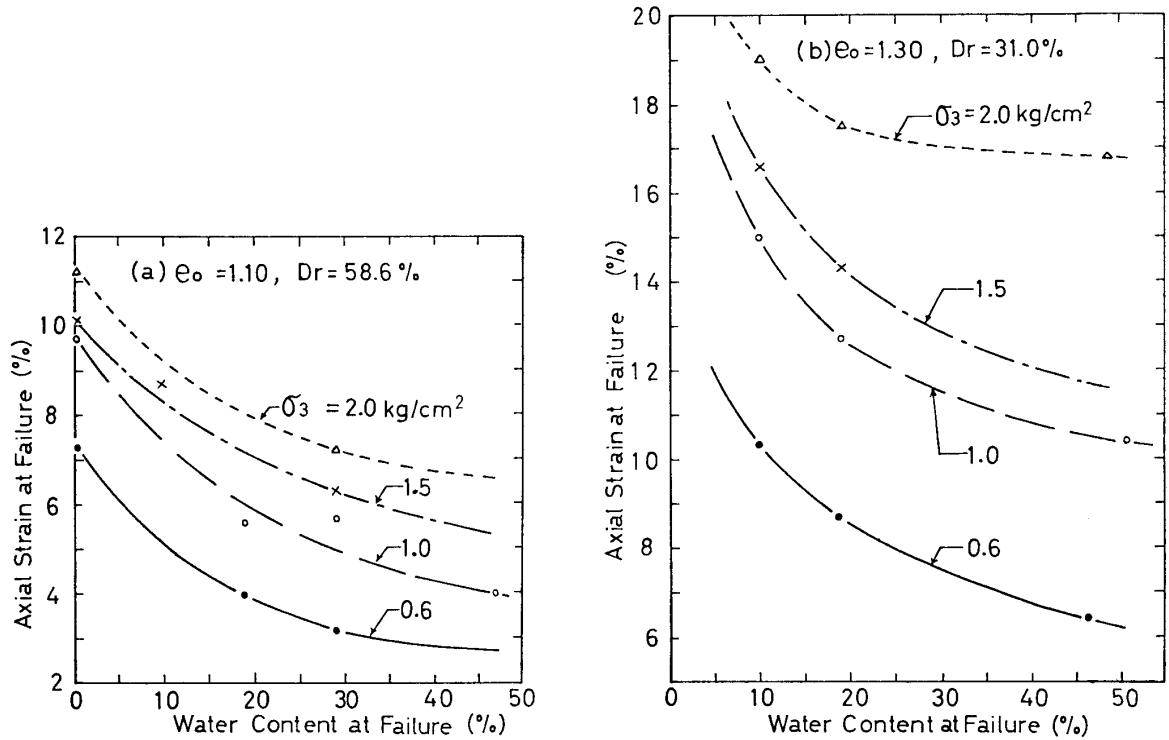


Fig. 6. Relation between axial strain and water content at failure

D = ダイレイタンス係数

$\sigma_2 = \sigma_3$ なる本試験では式 (2) は次式で表わされる。

$$\frac{\Delta V}{V} = -C \left(\frac{\Delta \sigma_1' + 2\Delta \sigma_3'}{3} \right) + \sqrt{2} D (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (3)$$

このような体積変化はせん断強さに影響し⁸⁾、また定体積せん断においては間ゲキ圧の挙動に関与する。

せん断中の体積変化の性質は、図—4 および 5 に示される体積変化・軸ヒズミ曲線において、軸ヒズミの増分 $d\varepsilon$ に対する体積変化率の増分 $d(\Delta V/V)$ の比によつて表わすことができる。すなわち

$$\left(\frac{d(\Delta V/V)}{d\varepsilon} \right)_f = \left(\frac{dv}{d\varepsilon} \right)_f^{21)} \quad (4)$$

ここに、 $v = \Delta V/V$ 、膨張のとき $\Delta V > 0$

f = 破壊時を表わす

$(dv/d\varepsilon)_f$ と破壊時の含水比との関係を図—7 に示す。この図によると、ダイレイタンスは含水比の増加にしたがつて密な供試体では減少し、ゆるいそれでは増加して 0 に近づく。また、含水比が高いほど水分の影響は少ない。い

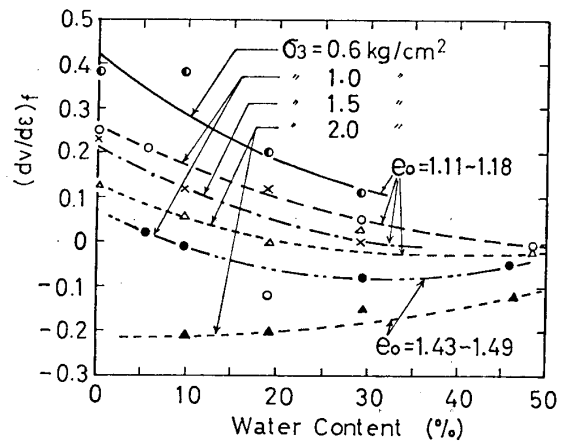


Fig. 7. Relation between dilatancy and water content at failure

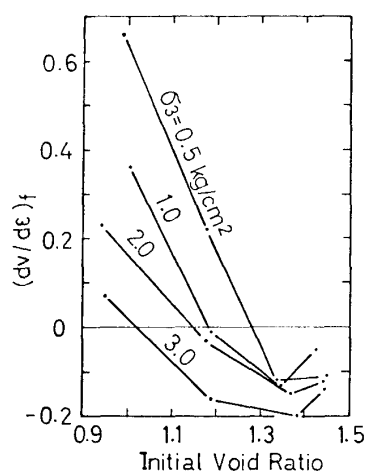


Fig. 8. Relation between dilatancy and initial void ratio for saturated Shirasu

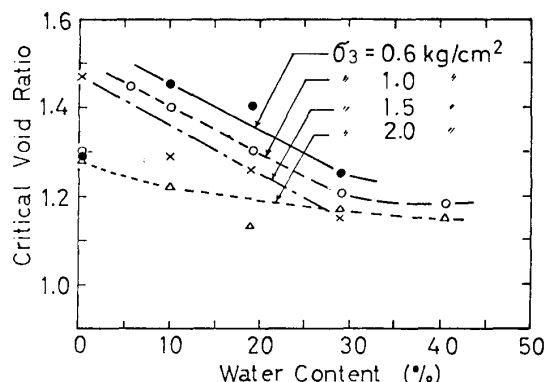


Fig. 9. Relation between critical void ratio and water content

ま参考のために普通砂に関する Lee et al¹⁷⁾, マサ土に関する内田ら¹⁹⁾, および三笠ら²²⁾ の試験結果をみると、ダイレイタンスはシラスと同じく含水比の増加にしたがつて減少している。

また、ダイレイタンスは、拘束圧の増加および供試体の間ゲキ比の増加（密度の減少）にしたがつて減少していることが図-7からわかる。この性質は普通の砂²³⁾ についても同じである。

4) 限界間ゲキ比

ダイレイタンスに関して限界間ゲキ比 e_{cr} が定義されるが、その定義に関しては、供試体の変形の面から大別して2つの考え方がある。1つは定常せん断状態に関係したもの、他の1つは破壊時の状態に関係したものである²⁴⁾。ここでは、定常せん断状態にある供試体の間ゲキ比を限界間ゲキ比として定義する。このとき、 $(dv/de)=0$ である。

いま、試験中の拘束圧 σ_3 別に、飽和シラスの $(dv/de)_f$ と初期間ゲキ比の関係を求めると、図-8のようになる。部分飽和シラスおよび気乾シラスについても同様な関係が得られた。図-8において、 $(dv/de)_f$ と初期間ゲキ比の関係曲線が、 $(dv/de)_f = 0$ なる直線と交わるときの間ゲキ比は、所定の拘束圧における限界間ゲキ比 e_{cr} を与える⁵⁾。このようにして求めた限界間ゲキ比と含水比との関係が図-9に示される。図-9によると限界間ゲキ比は含水比約30%までは水分増加にしたがつて減少しているが、30%をこえると変化が少ない。また、拘束圧が高いほど水分の影響は少なくなっている。したがって、自然地盤が不飽和状態で限界間ゲキ比よりも密な状態にあつても、水分が増加する過程で限界間ゲキ比自体が小さくなるので、地盤は相対的に限界間ゲキ比よりゆるい状態となり、外的作用による構造の乱れを受けやすくなると考えられる。

前項で述べたように含水比の増加とともにダイレイタンスが減少する性質を持つ粒状土においては、限界間ゲキ比も含水比の増加とともに減少するから、変形の観点からみても飽和状態が最も不安定であることの根拠が与えられる。

3. 2 セン断強さ

1) 破壊時の軸差応力

含水比別に破壊時の軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ を初期間ゲキ比 e_0 に対してプロットしたもののうち、

拘束圧が 0.6, 1.0, 1.5 および 2.0 kg/cm² の場合を示すと 図-10 のとおりである。いま, 図-10 にもとづいて初期間ゲキ比 e_0 が 1.10 および 1.40 のときの $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ を求め, 含水比に対してプロットすると 図-11 が得られる。図-10 および 11 によると, 含水比が 5~10% をこえると

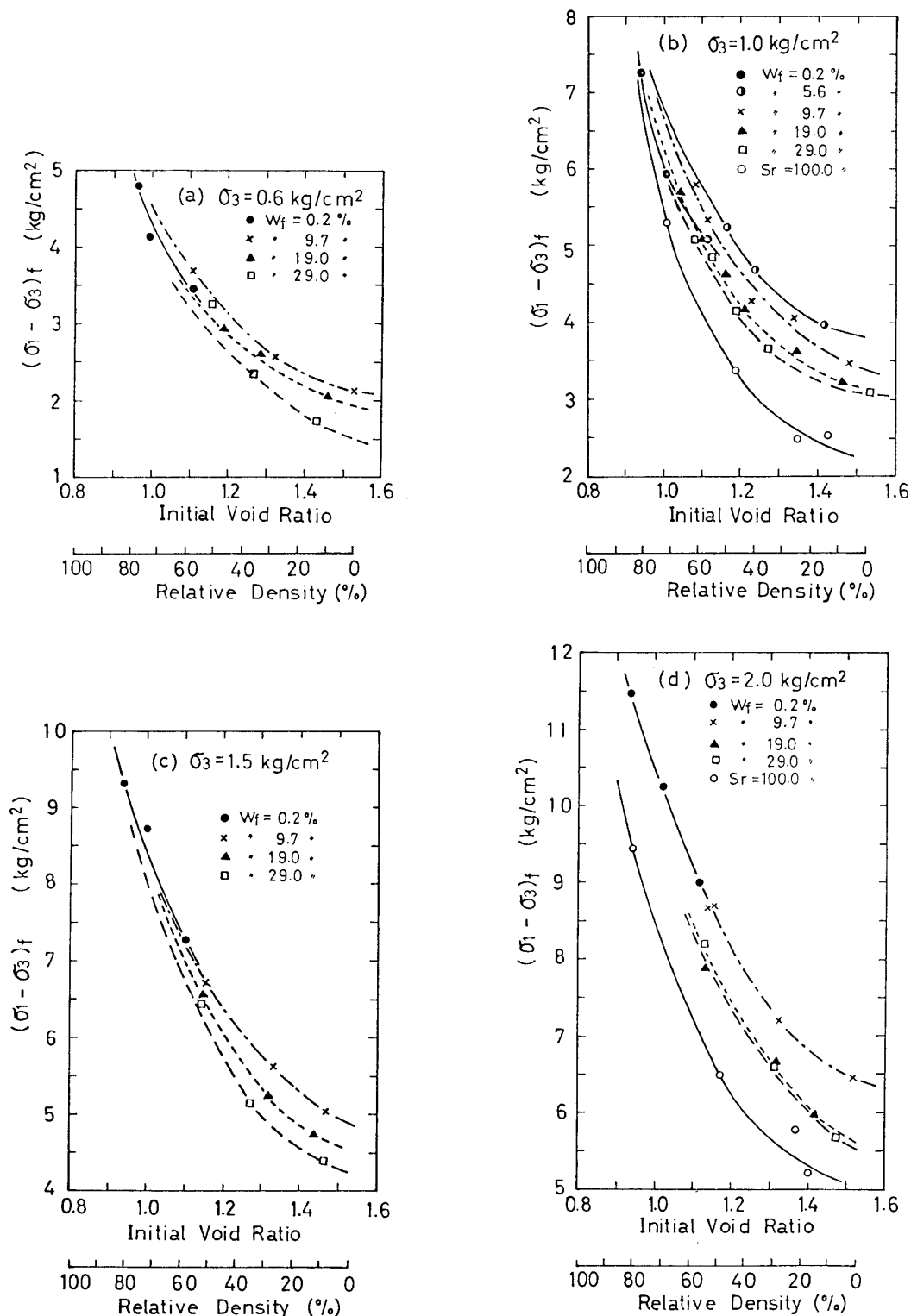


Fig. 10. Relation between deviator stress at failure and initial void ratio for given water contents

$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は水分の増加にしたがつてほぼ一定の割合で減少しており、その減少割合は拘束圧 σ_3 や初期間ゲキ比 e_0 に関係していないようである。気乾状態から含水比が 5~10%までは、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ は水分の増加とともに増加の傾向を示している。この場合の $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の変化は間ゲキ比や拘束圧ばかりでなく毛管張力あるいはサクションなどの影響によるものと考えられるが、この点は本試験においては確かなことはいえない。

2) 破壊包ラック線の性状およびせん断強さ定数

図-12は飽和シラスおよび空気乾燥シラスの破壊時の Mohr の円に対する包ラック線を示したものである。図の繁雑さをさけるために Mohr の円は消略した。部分飽和シラスの包ラック線は上記の両者の中間的性質を示している。飽和シラス以外の破壊包ラック線は曲線をなし、拘束圧が増すにしたがつて平坦化している。この傾向は間ゲキ比が一定の場合は含水比が小さいほど、含水比が一定の場合は間ゲキ比が小さいほど顕著である。飽和シラスの破壊包ラック線は試験の範囲では直線を示しているが、拘束圧をさらに高くすると部分飽和シラスと同じく曲線となるであろう。

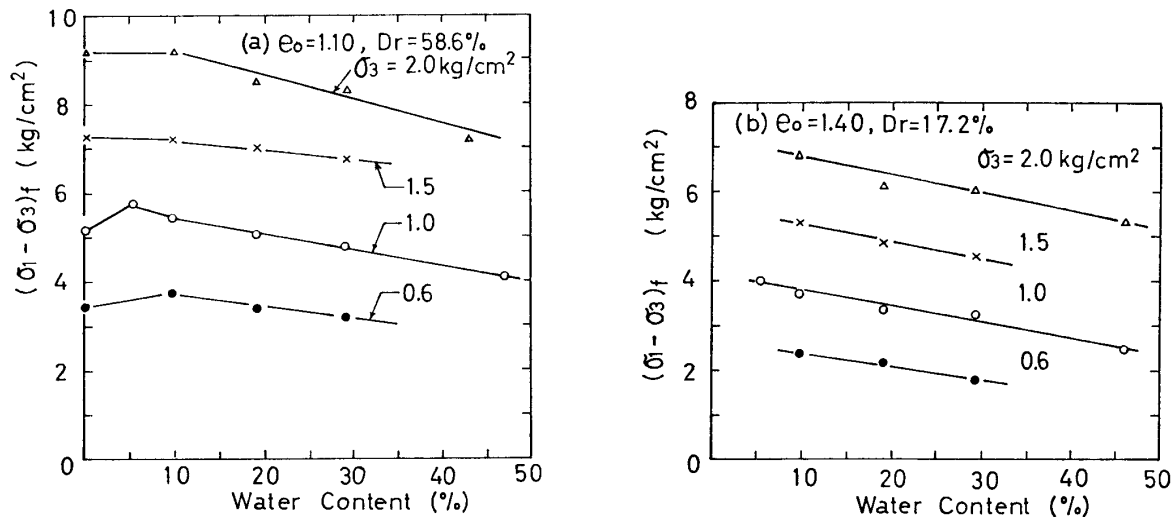


Fig. 11. Relation between deviator stress at failure and water content

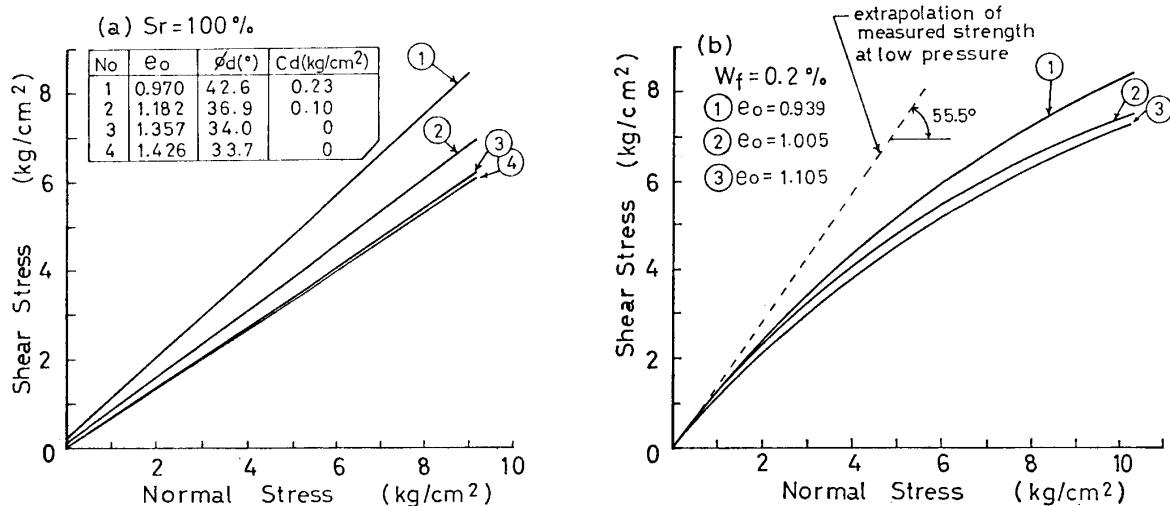


Fig. 12. Envelopes for Mohr circles at failure for (a) saturated Shirasu and (b) air-dried Shirasu

砂に関する Hall et al²⁵⁾, Hirschfeld et al²⁶⁾, Bishop et al²⁷⁾ および Lee et al¹⁷⁾ の高拘束圧三軸試験結果,あるいは de Beer²⁸⁾ の普通の三軸試験結果をみると,同じく包ラック線は曲線である。このような性質は,砂のせん断強さ定数は試験時の拘束圧の大きさによつて異なることを意味している。したがつて砂のせん断強さを表示する場合,砂の密度,排水条件,および含水比のほか拘束状態が明らかにされている必要がある。

いま,ある大きさの拘束圧のもとにあるシラスのせん断強さ定数 (c, ϕ) は, 図—13 に示されるように破壊包ラック線に対する接線の τ 軸切片およびコウ配によつて与えられると考えれば,その接線は Coulomb の式で表わされる。すなわち

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (5)$$

ここに, τ = 破壊面上のせん断応力

σ = 破壊面上の垂直応力

c = 見かけの粘着力

ϕ = セン断抵抗角

この考え方で求めた強さ定数と垂直応力の関係を図—14 に示す。これによると, 含水比が一定のときは初期間ゲキ比が小さいほど, また拘束圧が大きいほど c は増加し, ϕ は減少する。さらに, 初期間ゲキ比が一定のときは含水比が小さいほど, また拘束圧が大きいほど c は増加し, ϕ は減少する。また拘束圧が小さいとき間ゲキ比の違いによる c の差は少ないが, ϕ の差は大きく, 拘束圧が大きいとき間ゲキ比の違いによる c の差は大きいが ϕ の差は少ないことがわかる。これは拘束圧の増加にしたがつてかみ合いが強くなり, 構造に基因する強さは摩擦力成分としてよりも, 粘着力成分として発揮されるようになることを意味するものと解釈される。

ところで, シラスのような粒状土のせん断強さは粒子間摩擦による部分, 構造効果による部分, および粒子破碎の影響による部分から成ると考えられる。いま, 粒子間摩擦だけがせん断強さに寄与しておれば, Coulomb の摩擦法則から破壊包ラック線は直線となり, cohesion intercept は 0 となるはずである。したがつ

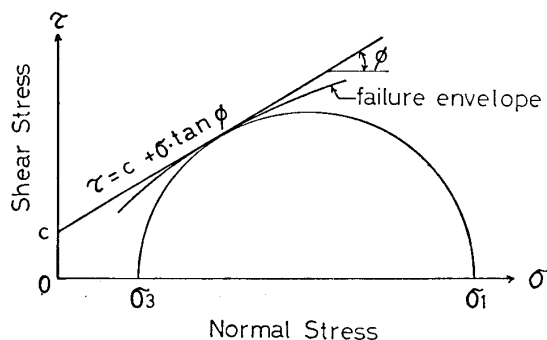


Fig. 13. Method of determination of parameter of shear-strength at a certain pressure

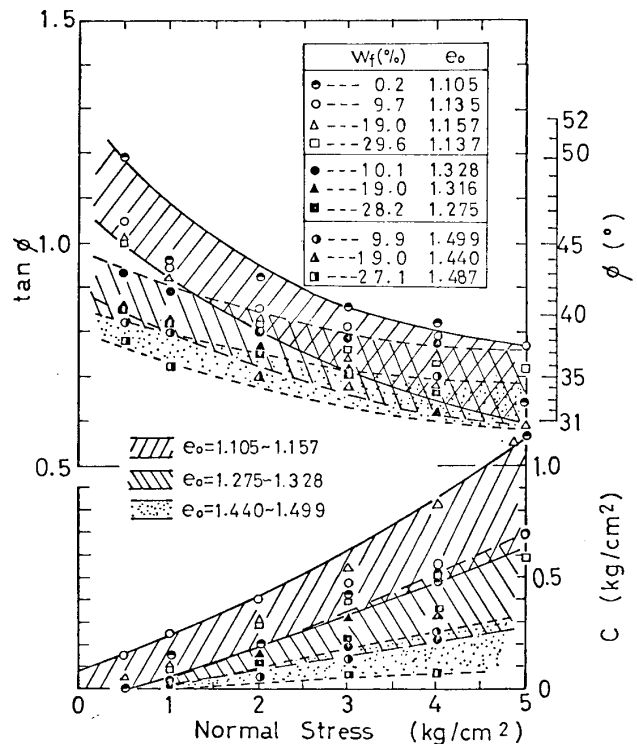


Fig. 14. Change in friction-component and cohesion component caused by change in pressure

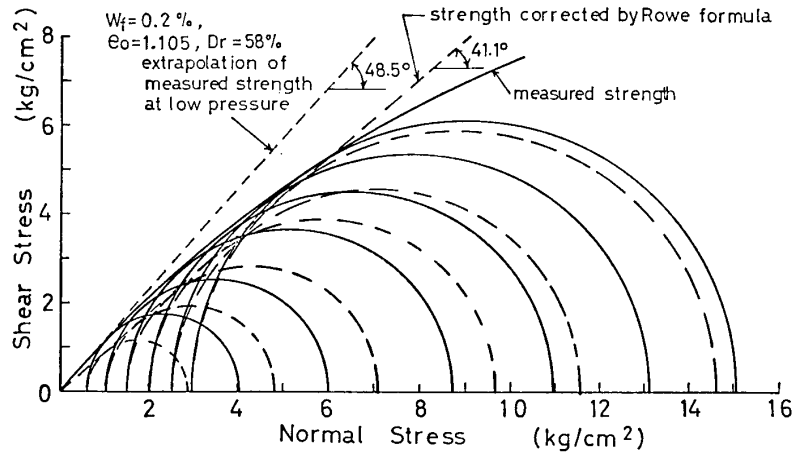


Fig. 15. Mohr circles and envelopes for air-dried Shirasu

て、破壊包ラック線が曲線となる原因としてはせん断中の粒子破碎の影響および構造の影響の2つが考えられる。

いま、Rowe²⁹⁾の応力・ダイレイタンスー論による式

$$\frac{\sigma_1}{1 + \left(\frac{dv}{d\epsilon}\right)_f} - \sigma_3 = (\sigma_1 - \sigma_3)_R \quad (6)$$

ここに、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$ = 補正軸差応力

を用いて、破壊時の軸圧 σ_1 を補正して軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_R$ を求めて Mohr の図を描くと、補正包ラック線は図-15に破線で示されるように原点を通る直線となる。他の全ての試験結果についても同じ性質が得られた。したがって、包ラック線が曲線をなすことは主として構造の影響であることが明らかとなった。図-15の実線は破壊包ラック線である。これらの事実から、式(5)における cohesion intercept c は構造の関数であり、摩擦力成分 $\sigma \cdot \tan \phi$ は粒子間の摩擦と構造の関数であると考えられる。

つぎに、破壊包ラック線が曲線となることを無視して、最小自乗法によつて求めたせん断強さの平均的なパラメーター (c_d, ϕ_d) を、含水比別に初期間ゲキ比に対してプロットすると、図-16のようになる。いま、初期間ゲキ比 e_0 が 1.10 および 1.40 のときの c_d および ϕ_d を図-16から求め、含水比に対してプロットすると図-17が得られる。図-16および17からつぎのような事が明らかとなる。すなわち、

せん断抵抗角 ϕ_d については

(1) 相対密度が約 70 % 以上のとき含水比の増加に

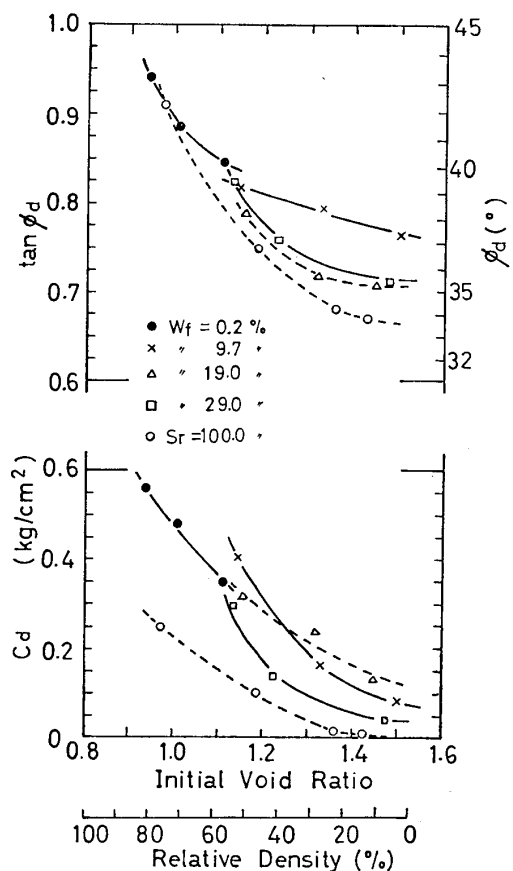


Fig. 16. Angle of shearing resistance and apparent cohesion obtained by the least square method for given water contents

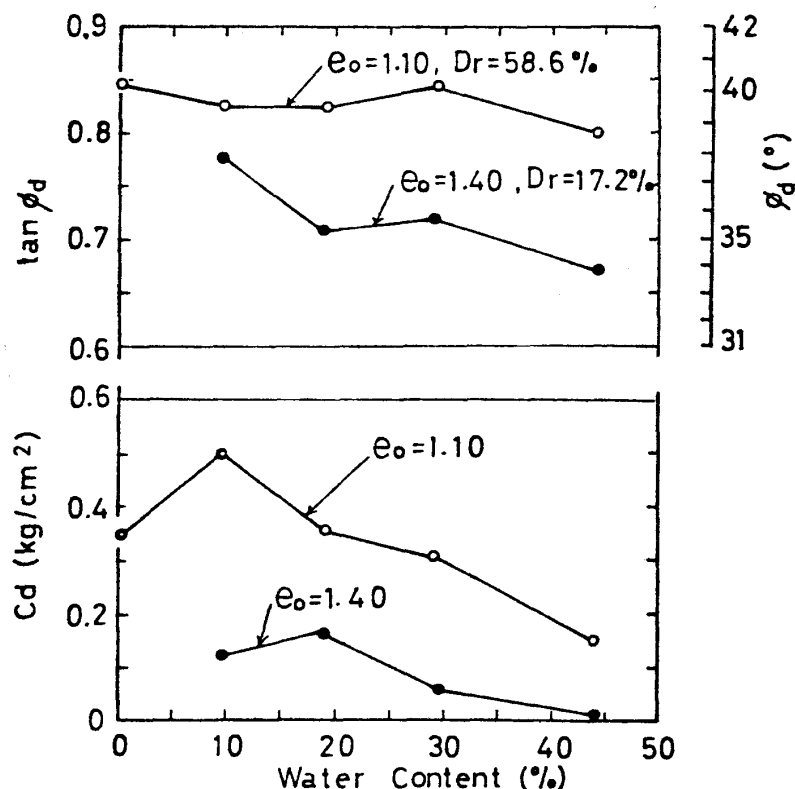


Fig. 17. Relation among angle of shearing resistance, apparent cohesion and water content at initial void ratio of 1.10 and 1.40

よつて生ずる ϕ_d の変化はみられないが、それが約 70 % 以下になると ϕ_d は水分の増加にしたがつて減少する。

(2) 含水比約 10 % までは ϕ_d に対する水分の影響は少ない。

(3) ゆるい状態ほど水分の影響を受けやすい。

見かけの粘着力 c_d については

(1) c_d は含水比 10~20 % の範囲で最大値を示し、最大値を与える含水比は密な状態では低く、ゆるい状態では高い。

(2) すべての密度にわたつて水分の影響を受けている。ことに密な状態ほど水分の影響が大きい。

以上の試験結果からせん断強さを構成する粘着力成分と摩擦力成分はそれぞれ独立に水分の影響を受けることが明らかとなつた。

3. 3 セン断強さとダイレイタンスの関係

簡単のために cohesion intercept を無視して式 (7) によつて係数 $\sin \varphi_f$ を求め、 $(dv/de)_f$ に対してプロットすると図-18 が得られる。

$$\sin \varphi_f = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \quad (7)$$

$(dv/de)_f$ が小さいほど、 $\sin \varphi_f$ も小さい。図-7 に示したように、含水比が増加するほど $(dv/de)_f$ は減少しているから、せん断強さが減少する原因は含水比の増加によつて構造の効果が失なわれる

ことにあると考えられる。粒子間に形成される水膜は滑材としての作用と、毛管張力としての作用の相反する効果を持っている。どちらの作用が卓越するかは粒子の形状¹⁶⁾あるいは含水比によつて異なると考えられるが、3. 2の1) に示した試験結果から含水比が約5~10%をこえると、表面がなめらかなガラス質粒子の多いシラスにあつては、水膜は滑材として作用すると考えられる。ここに、構造効果を失なう1つの原因がある。

4. 結 論

間ゲキ比および含水比の異なる締固めたシラス供試体に関して排水三軸圧縮試験を行ない、シラスのせん断特性に対する密度および含水比の影響を考察した。それによつてつぎの結論が導かれる。

- (1) 試験に用いた拘束圧の範囲内では供試体はすべてせん断破壊を示した。
- (2) 含水比の増加とともに、破壊時の軸ヒズミおよびダイレイタンスは減少する。ダイレイタンスの減少のため限界間ゲキ比もまた含水比の増加とともに減少する。したがつて変形の観点からも飽和状態が最も危険である。
- (2) 破壊時の軸差応力は含水比5~10%までは増加しているが、これ以上の含水比においては水分の増加にしたがつてほぼ一定の割合で減少している。
- (3) 気乾シラスと部分飽和シラスの破壊包ラック線は曲線となり、拘束圧の増加にしたがつて平坦化する。それで、せん断強さ定数は拘束圧によつて異なる。低い拘束圧の下では摩擦力成分が大きく、高い拘束圧の下では粘着力成分が大きい。この性質は間ゲキ比が小さいほど、また含水比が小さいほど著しい。
- (4) 破壊時の軸差応力を Rowe の応力・ダイレイタンス論によつて補正すれば、補正包ラック線は原点を通る直線となる。したがつて、補正しない包ラック線が曲線となること、およびせん断強さが見かけの粘着力を持つことの理由はインターロッキングを含む構造の寄与にある。
- (5) 最小自乗法によつて求めた平均的なせん断強さ定数によれば、せん断抵抗角と見かけの粘着力はそれぞれ独立に水分の影響を受ける。すなわち、相対密度が約70%以上のとき、含水比の変化に伴うせん断抵抗角の変化は認められない。それが約70%以下になると、せん断抵抗角は含水比の増加にしたがつて減少する。含水比約10%まではせん断抵抗角に対する水分の影響は少ないが、見かけの粘着力は含水比10~20%の範囲で最大値を示し、最大値を与える含水比は密な状態で低く、ゆるい状態で高い。せん断抵抗角はゆるい状態ほど、見かけの粘着力は密な状態ほど水分の影響を

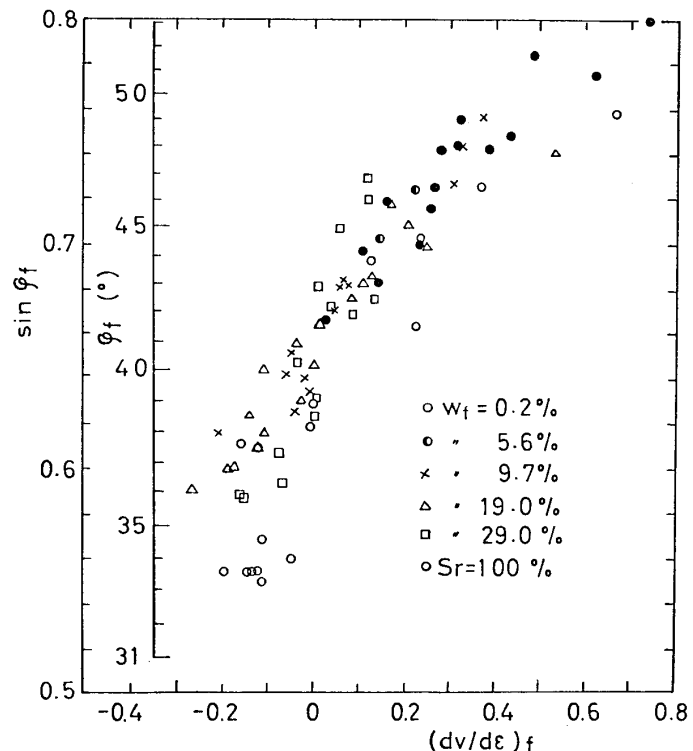


Fig. 18. Strength parameter versus dilancy plots for water content from air dried to saturated Shirasu

受けやすい。

(6) 含水比の増加に伴うセン断強さの減少の原因は、構造効果の減少にある。

謝辞：この研究はシラスのような粒状土のセン断特性に関する研究の一部である。多くの点で指導をいただいている九州大学工学部山内豊聰教授，ならびにシラスについてかねて有意義な討議をいただいている本学農学部木村大造教授に併せて深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 春山元寿・山内豊聰：南九州における火山性堆積土シラスに関する文献集録，九州大学工学部土木工学教室，昭 40.11.
- 2) Taneda, S., S. Miyachi, and M. Nishihara: Geological and Petrological Studies of the "Shirasu" in South Kyushu, Japan, Part 111. The "Shirasu" in the Tsuruda-Hiwaki-Koriyama Area, North of Kagoshima City, Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Geology, Vol. 6, No. 2, May 1957, pp.107-127.
Miyachi, M.: Petrological Study of the Shirasu in Southern Kyushu, Japan, 1. Some Petrographical Notes, Rep. Earth Sci., Dept. General Edu., Kyushu Univ., No. 10, 1963, pp. 55~60.
- 3) 春山元寿・山内豊聰：土粒子のインターロッキングを考慮したシラス層の直立斜面の安定について，九州大学工学集報，Vol. 40, No. 3, 昭 42.6, pp. 370~378.
- 4) Haruyama, M.: Effect of Water Content on the Shear Characteristics of Granular Soils Such as Shirasu, Soils and Foundations, Vol. 9, No. 3, Sept. 1969, pp.35~57.
- 5) 春山元寿・山内豊聰：乱したシラスの排水セン断性について，土と基礎，Vol. 14, No. 8, 昭 41.8, pp. 27~33.
- 6) 春山元寿：乱さないシラスの排水セン断特性について (1)，土木学会西部支部昭和 43 年度研究発表会論文集，昭 44.2, pp. 261~264；および同 (2)，同 44 年度研究発表会論文集，昭 45.2, pp. 193~196.
- 7) Yamanouchi, T. and M. Haruyama,: Shear Characteristics of Such Granular Soil as Shirasu (Collapsible Granular Soil of Volcanic Product), Mem. Fac. Eng., Kyushu Univ., Vol. 29, No. 1, Oct. 1969, pp. 53~64.
- 8) Haruyama, M.: Effect of Surface Roughness on the Shear Characteristics of Granular Materials, Soils and Foundations, Vol. 9, No. 4, Dec. 1969, pp. 48~67.
- 9) 山内豊聰・春山元寿：砂のセン断強さに対する粒子形状の影響について，九州大学工学集報，Vol. 40, No. 4, 昭 42.7, pp. 542~552.
- 10) 春山元寿：未発表
- 11) 春山元寿：シラスのセン断特性に対する軽石レキの影響，第 4 回土質工学研究発表会講演集，昭 44.6, pp. 487~492.
- 12) 河原田礼次郎：シラスの物理的，力学的性質に関する研究 (第 1 報)，鹿児島大学農学部学術報告，No. 6, 昭 32.12, pp. 222~226.
- 13) Bishop, A. W. and A.K.G. Eldin: The Effect of Stress History on the Relation between φ and Porosity in Sand, Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Zurich, 1, 1953, pp. 100~105.
- 14) Tschbotarioff, G.P.: Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, McGraw-Hill, New York, 1951, 655pp.
- 15) Nash, N.L.: The Shearing Resistance of a Fine Closely Graded Sand, Proc. 3rd Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Zurich, 1, 1953, pp. 160~164.
- 16) Horn, H.M. and D.U. Deere: Frictional Characteristics of Minerals, Géotechnique, Vol. 12, No. 4, Dec. 1962, pp. 319~335.
- 17) Lee, K.L., H.B. Seed, and P. Dunlop: Effect of Moisture on the Strength of a Clean Sand, Jour. Soil Mech. and Fnuud. Div., Amer. Soc. Civ. Eng., Vol. 39, No. SM 6, pp. 17~40.
- 18) 赤井浩一・森寛昭：組合わせ圧縮応力下における和泉砂岩の破壊機構に関する研究，土木学会論文集，No. 147, 昭 42.11, pp. 11~24.
- 19) Uchida, I., R. Matsumoto, and K. Onitsuka: Shear Characteristics of Compacted Partially Saturated Soils, Soils and Founds., Vol. 8, No. 3, Sept. 1968, pp. 32~45.

- 20) Skempton, A.W.: The Pore-pressure Coefficient in Saturated Soils, *Géotechnique*, Vol. 10, No.4, Dec. 1960, pp. 186~187.
- 21) Bishop, A.W.: Correspondence on "Shear Characteristics of a Saturated Silt, Measured in Triaxial Compression", *Géotechnique*, Vol. 4, No. 1, Mar. 1954, pp. 43~45.
- 22) 三笠正人ほか: マサ土のせん断特性, 土木学会第23回年次学術講演会講演概要, 3, 昭43.10, pp.171~174.
- 23) 土質工学会: 土のせん断試験法に関する基礎的研究, 昭43.1, 104p.
- 24) 春山元寿: 砂のダイレイタンスーに影響する因子について, 第5回土質工学研究発表会講演集, 昭45.6, pp. 61~64.
- 25) Hall, E.B. and B.B. Gordon: Triaxial Testing with Large-Scale High Pressure Equipment, "Laboratory Shear Testing of Soils", Amer. Soc. Testing Materials, S. T. P. No.361, 1963, pp. 315~328.
- 26) Hirschfeld, R.C. and S.J. Poulos: High-Pressure Triaxial Tests on a Compacted Sand and an Undisturbed Silt, "Laboratory Shear Testing of Soils", Amer. Soc. Testing Materials, S. T. P. No. 361, 1963, pp. 329~339.
- 27) Bishop, A. W., D. L. Webb, and A. E. Skinner: Triaxial Test on Soil at Elevated Cell Pressures, Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Montreal, 1, 1965, pp. 170~174.
- 28) De Beer, E.: Influence of the Mean Normal Stress on the Shearing Strength of Sand, Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., Montreal, 1, 1965, pp. 165~169.
- 29) Rowe, P.W.: The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, Proc. Royal Soc., London, Ser. A, Vol. 269, 1962, pp. 500~527.

(1970.5)

SUMMARY

This paper deals with the effects of water content and density on the shearing properties of Shirasu ascertained by means of the drained triaxial compression tests. Shirasu is a local term for volcanic products consisting mainly of volcanic ash, coarse ash, and pumiceous lapilli of the Pleistocene epoch, accompanied by some derived rock-fragments. It may also be classified, by means of its origin, into the unwelded part of pumice flows, pumice falls, and their secondary sediments. Such deposits have been distributed around almost all the volcanic caldera in Japan. Shirasu exhibits the color mostly of grayly white, but locally of dark yellow, slight rouge, or dark gray. Undisturbed Shirasu shows, as usual, a general appearance of loose lapilli tuff, but it turns into granular soil when disturbed.

In spite of the fact that Shirasu is composed of primary minerals such as volcanic glass, plagioclase, and augite and is a soil devoid of clay minerals, it has a considerable amount of apparent cohesion. The author has studied the singularity of shear characteristics of Shirasu to ascertain that the shear characteristics were dependent on the structural effect due to the geometrical arrangement of the grains, based both on the grain-size-distribution and on the peculiar shape and surface texture of the grain. It has also been presented that the apparent cohesion is caused by the structural effect.

Shirasu used in the test was obtained at Toso in Kagoshima City, and was geologically in the category of the unwelded part of Ito pumice flow. The part of the Shirasu that passed through the sieve of 4,760 micron mesh was used for the test. The index properties of the sample are shown in Table 1. Fig. 1 gives the compaction-characteristics of the sample. The grain-size-distribution is shown in Fig. 2. The gravel fraction of the sample consists mainly of pumice and of a small amount of derived rock-fragments such as andesite. The shape and surface texture of the grains finer than 2,000 micron is shown in Photo 1.

Specimens, initially 5.0 cm in diameter and 12.5 cm in height, were prepared at five water contents from air-dried-condition to full saturation. For each water content, the specimens were prepared at three or four initial void ratios. Fig. 3 shows a split mold in which air-dried-specimens were prepared. Photo 2 shows the compacted specimen of partially saturated Shirasu. Drained triaxial compression tests were performed by increasing the axial load at a constant confining pressure. Prior to compression, the specimens were fully consolidated in the cell under the pressure ranging 0.5 to 3.0 kg/cm² and then were subjected to deviator stress at a constant rate of strain of 0.8 per cent per minute. Measured stresses are equal to the effective stresses, and no cavitation of pore water occurs under such shear rate and drained condition. The axial load, the axial strain, and the volume change during the shearing were measured.

Basing on the tests the following conclusions might reasonably be made:

(1) Regardless of the initial void ratio of specimen, shear failure occurred in the range of the confining pressure used in the tests. (Photo 3)

(2) Axial strain at failure increases with an increase in initial void ratio and in confining pressure. Dilatancy and critical void ratio decrease with an increase in the confining pressure and in the void ratio. Failure-strain and dilatancy decrease also with an increase in water content. On account of the decrease in dilatancy, critical void ratio also decreases with an increase in water content. Thus, the saturated state is most unstable seen from the viewpoint of deformation. (Fig. 4~9)

(3) Deviator stress at failure has a tendency to increase in the range of the water content from 5 to 10 per cent, but it decreases at approximately constant rate with an increase in water content, exceeding that of 10 per cent. (Fig. 10 and 11.)

(4) Failure envelopes for air-dried and partially saturated Shirasu form curved line, with the tendency to be made progressively flattened with an increase in the confining pressure. Thus, the parameters of shearing strength vary with the confining pressure, i. e., it is ascertained that the contribution of the angle of shearing resistance is large under the lower confining pressure, while that of cohesion-component is large under the higher pressure. These characteristics become more remarkable for dense specimens having low water content. (Fig. 12, 14, and 15.)

(5) When the measured stress at failure is corrected by Rowe's stress-dilatancy-theory (Eq. 6), the corrected failure envelope turns into a straight line passing through the origin. Therefore, the facts that an uncorrected failure envelope is curved and that the shearing strength brings about a cohesion-intercept may reasonably be attributed to the effect of the structure, involving particle interlocking. (Fig. 15)

(6) Considering the mean parameters of shearing strength obtained by the least square method, it was ascertained that the angle of shearing resistance and the apparent cohesion are independently affected by moisture. That is, when the relative density is more than about 70 per cent and the water content is lower than about 10 per cent, the angle of shearing resistance is left unvaried irrespective of the change in water content, whereas it decreases with an increase in water content in case of other values of relative density and water content. The apparent cohesion, in all the ranges of density, shows a maximum value in the range of water content of about 10 to 20 per cent, and decreases considerably with an increase in moisture in the range exceeding about 10 to 20 per cent. The angle of shearing resistance is more liable to be affected by the effect of moisture in the looser state, and it is the same concerning the apparent cohesion in the denser state. (Fig. 16 and 17)

(7) The decreasing in the shearing strength concomitant with an increase in water content is caused by the reduction of structural effect. (Fig. 18)